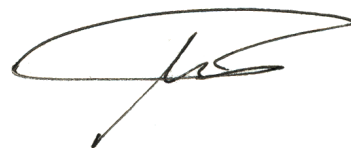


На правах рукописи



Мещеряков Константин Игоревич

**ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И
МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ В АЭРОДИНАМИКЕ
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЛОПАСТИ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 01.02.05 —
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону — 2016

Работа выполнена в Южном Федеральном Университете на кафедре теоретической и компьютерной гидроаэродинамики

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Сумбатян Межлум Альбертович

Официальные оппоненты: **Поташев Андрей Валерьевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Казанский кооперативный институт (филиал) Российского университета кооперации,
профессор кафедры естественных дисциплин, сервиса и туризма

Лобачев Михаил Павлович,
кандидат технических наук,
ФГУП "Крыловский государственный научный центр",
начальник отделения математического моделирования и высокопроизводительных вычислений

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет»

Защита состоится 29 декабря 2016 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 на базе ФГАОУ ВО КФУ по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, ауд. 2 мех.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «Научная библиотека им. Н.И. Лобачевского» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 35 и по адресу http://kpfu.ru/dis_card?p_id=2271.

Автореферат разослан «___» ноября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.081.11, к.ф.-м.н., доцент



Саченков Андрей Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время, в связи с потенциальной ограниченностью запасов традиционного топлива, высок интерес к возобновляемым источникам энергии, таким, как геотермальная энергия, солнечная энергия и энергия ветра. Так, в Европе в среднем более, чем четверть вырабатываемой энергии поставляется из возобновляемых источников. Большая часть этой энергии поступает из гидроэлектростанций, однако объем электроэнергии, извлекаемой из атмосферных потоков воздуха вплотную приближается, а в некоторых случаях (к примеру, в случае Германии) и превосходит объем гидроэлектроэнергии. Кроме того, стоимость одного кВт·ч. энергии ветра неукоснительно снижается, и, как ожидается, к 2020 г. окажется ниже стоимости ядерной энергии и энергии угольных электростанций.

Согласно известному закону Бетца, максимальная энергоэффективность горизонтально-осевой ВЭУ, т.е. максимальная доля энергии ветра, которая может быть извлечена, составляет примерно 0.59. Однако, лучшие экземпляры ВЭУ, существующие на сегодняшний день, могут достигнуть энергоэффективности от 0.45 до 0.5. Таким образом, важна дальнейшая оптимизация составных частей ВЭУ, в первую очередь лопастей.

Целью данной работы является построение эффективного алгоритма оптимизации лопастей ВЭУ, с помощью которого можно провести мультикритериальную оптимизацию лопастей для заданных режимов работы и исследование факторов, способных улучшить аэродинамические характеристики ВЭУ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать эффективный генетический алгоритм (ГА), позволяющий провести оптимизацию лопасти ВЭУ при заданных режимах работы.
2. Провести проверку разработанного ГА, используя классические теории расчета аэродинамических характеристик лопасти.
3. Разработать программный комплекс, позволяющий получать данные о аэродинамических характеристиках крыловых профилей, используемых в основе лопастей ВЭУ на основе данных об их геометрии для различных режимов обтекания, которые используются в используемых в ГА классических теориях.

4. Исследовать влияние на характеристики лопасти некоторых геометрических преобразований задней кромки, которые могут иметь место при производстве реальной лопасти.
5. Вывести двумерное интегральное уравнение трехмерной аэродинамической теории вращающейся лопасти ВЭУ и разработать эффективный алгоритм его решения.
6. Разработать вычислительно-эффективный математический аппарат, который может быть использован для разработки целевой функции ГА.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Двумерные граничные интегральные уравнения, позволяющие провести расчет характеристик тонких лопастей, не требуя покрытия вихревого следа расчетной сеткой, что уменьшает время работы алгоритмов, основанных на них по сравнению с методами конечных элементов, конечных объемов и граничных интегральных уравнений, требующих проведения расчета по вихревому следу.
2. Программный комплекс для получения значения коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления на основе геометрии лопасти.
3. Анализ влияния изменения геометрии задней кромки лопасти на ее аэродинамические характеристики.
4. Реализация генетического алгоритма, способная быстро провести многоцелевую оптимизацию лопасти ВЭУ, не требуя знания градиента целевой функции и обладающая высокой вероятностью достижения глобального оптимума.

Научная новизна:

1. Была выполнена оригинальная реализация метода ГА для нужд оптимизации лопасти ВЭУ.
2. Было проведено оригинальное исследование влияния преобразований задней кромки аэродинамического профиля на его аэродинамические характеристики.
3. Была выполнена оригинальная разработка комплекса программ, позволяющих получать данные об аэродинамических характеристиках крыловых профилей.

4. Впервые было получено двумерное граничное интегральное уравнение (ГИУ), позволяющее в трехмерной аэродинамической теории рассчитывать характеристики лопасти ВЭУ, которое выполняется только по поверхности лопасти.

Методика исследования основывается на использовании научных положений гидромеханики, аэродинамики, теоретической механики, применении интегрального преобразования Фурье, плоской и трехмерной аэродинамической теории крыла, а также применения методов математического моделирования на ЭВМ, а также методов вычислительной математики.

Практическая значимость Результаты, полученные в диссертации, носят как практический, так и теоретический характер. Представленные реализации ГА и комплекса программ для получения данных о аэродинамических характеристиках лопасти ВЭУ могут быть использованы при проектировании реальных лопастей. Полученное в 4 главе ГИУ может быть использовано при расчетах лопастей, и, кроме того, может являться основой для дальнейших теоретических исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгим математическим аппаратом, основанном на точных уравнениях гидродинамики и аэродинамики, сравнением с результатами численных экспериментов, проведенных с помощью реализации метода конечных объемов, предоставляемой пакетом ANSYS. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

1. международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды». (Ростов-на-Дону, 2010);
2. международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды». (Ростов-на-Дону, 2012);
3. международная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения — III». (Ростов-на-Дону, 2013);
4. международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды». (Ростов-на-Дону, 2014);

5. международная научная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения – V». (Ростов-на-Дону, 2015);
6. международная конференция «Актуальные проблемы м.с.с.». (Цахкадзор, Армения, 2012);
7. научный семинар кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Южный Федеральный Университет. (Ростов-на-Дону, 2016);

Личный вклад. Исследования, изложенные в диссертации, выполнены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в работу включен материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками. В работе [1] Сумбатяну М. А. принадлежит постановка задачи, Бондарчуку А. А. принадлежат расчеты характеристик профиля с помощью метода конечных элементов, Мещерякову К. И. принадлежит оптимизация геометрии лопасти с помощью ГА. В работе [2] Сумбатяну М. А. принадлежит постановка задачи, Мещерякову К. И. принадлежит оптимизация геометрии лопасти с помощью ГА. В работе [3] Сумбатяну М. А. принадлежит постановка задачи, Мещерякову К. И. принадлежат написание комплекса программ для автоматизации выполнения расчетов характеристик аэродинамического профиля, расчеты и сравнение. В работе [4] Сумбатяну М. А. принадлежит постановка задачи, Бондарчуку А. А. принадлежат расчеты характеристик тонкого профиля с помощью метода конечных элементов, Мещерякову К. И. принадлежит создание программы для расчетов с помощью ГИУ. В работе [6] Бондарчуку А. А. принадлежат постановка задачи, Мещерякову К. И. принадлежит реализация численного алгоритма. В работе [8] Бондарчуку А. А. принадлежат постановка задачи, Мещерякову К. И. принадлежит оптимизация геометрии лопасти с помощью ГА. В работе [9] Сумбатяну М. А. принадлежит постановка задачи, Мещерякову К. И. принадлежит реализация численного алгоритма. В работе [11] Сумбатяну М. А. принадлежит постановка задачи, Мещерякову К. И. принадлежит реализация численного алгоритма.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 4 из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК ([1-4]).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Полный объем диссертации **142** страницы с **30** рисунками и **6** таблицами. Список литературы содержит **124** наименования.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке гранта проектной части госзадания Министерства образования и науки Российской Федерации 9.1371.2014/К.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, обосновывается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе «Обзор научной области» представлен обзор текущего положения дел в области ветроэнергетики, описаны применяющиеся в настоящее время методы расчета характеристик лопастей роторов ветроустановок, дано краткое введение в генетические алгоритмы и приведен обзор литературы, посвященной оптимизации геометрии лопастей ветроэнергетических установок.

Во второй главе «Применение генетического алгоритма к оптимизации геометрии лопасти ветроустановки с заданным сечением лопасти» представлена реализация генетического алгоритма, и с ее помощью проведены оптимизационные процессы геометрии лопасти ВЭУ для двух случаев с применениями различных методов расчета ее характеристик. **Раздел 2.1** кратко описывает содержимое главы. **В разделе 2.2** представлена численная реализация генетического алгоритма для вещественнозначных генов, применяемая в дальнейшей работе. В качестве стратегии отбора используется стратегия элитизма, в качестве метода рекомбинации — модифицированный метод промежуточной рекомбинации. В качестве остальных стратегий выбраны стандартные стратегии, применяемые в случаях вещественнозначных ГА. **В разделе 2.3** представленный генетический алгоритм применяется для оптимизации угла установки

$\alpha_{уст}$ и длины хорды b сечений телесной лопасти ВЭУ, обтекаемой однородным потоком ветра. При этом, для нахождения вращательного момента, генерируемого лопастью, используется гипотеза плоских сечений, в рамках которой отдельные двумерные сечения лопасти рассматриваются независимо друг от друга, а сам момент находится по формуле:

$$|\mathbf{M}| = \frac{\rho}{2} \int_0^L b(z) \sqrt{U_{ветра}^2 + \omega^2 z^2} (C_Y |U_{ветра}| - C_Q |\omega| z) z dz,$$

где L — длина лопасти, C_Y и C_Q — коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления соответственно. Значения этих коэффициентов берутся из заранее просчитанных с помощью метода конечных объемов таблиц. Представлены результаты оптимизационного процесса для модельной ВЭУ. В разделе 2.4 проводится оптимизация угла установки и хорды лопасти, представляющей собой тонкую закрученную пластину, работающей в горизонтальном цилиндрическом тоннеле постоянного диаметра, представленном на рис. 1. Жидкость считается идеальной и несжимаемой. В каждом сечении, перпендикулярном размаху лопасти (s), задача считается двумерной.

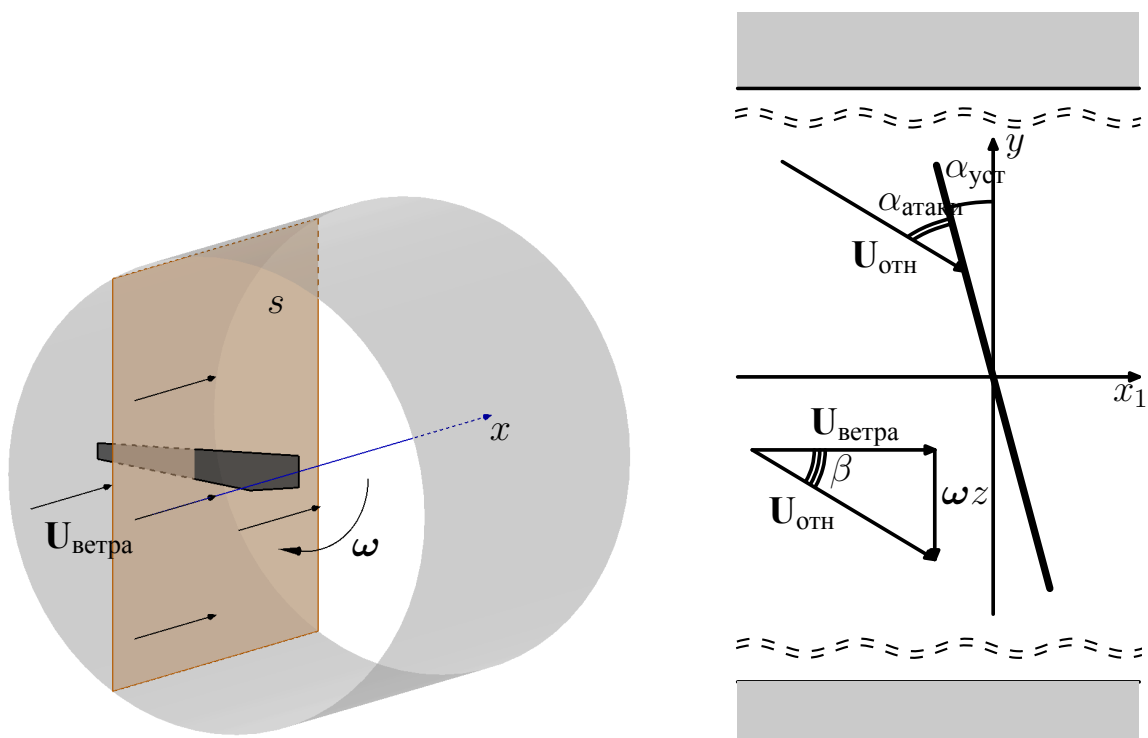


Рис. 1 — Геометрия сечения и набегающего потока

Для расчета характеристик лопасти в данной задаче в разделе выведено одномерное ГИУ на основе уравнения Лапласа для потенциала $\varphi(x, y)$:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

При этом область расчета разбивается на две подобласти 1) $x < 0, y < R$; 2) $x \geq 0, y < R$, где R – ширина цилиндра в текущем сечении, т.е. размер сечения s в направлении оси y . При этом ставятся следующие граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \varphi^{[1,2]}}{\partial y} \right|_{y=\pm R} = 0 \quad (2)$$

$$\varphi_{0x}(y) + \varphi_{0y}(y)\alpha_{уст} = |\omega| z\alpha_{уст} - |\mathbf{U}_{ветра}|, \quad y \in [-b, b] \quad (3)$$

$$\varphi_{0x}^{[1]}(y) = \varphi_{0x}^{[2]}(y), \quad y \in (-R, -b) \cup (b, R), \quad (4)$$

После ряда преобразований, (1) приводится к следующему ГИУ:

$$\frac{1}{8R} \int_{-b}^b g_y(\gamma) \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4R}(\gamma + y) \right) - \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4R}(y - \gamma) \right) \right) d\gamma = |\omega| z\alpha_{уст} - |\mathbf{U}_{ветра}|, \quad (5)$$

где $g(y) = \varphi^{[2]}(0, y) - \varphi^{[1]}(0, y)$. При этом разница давлений на поверхностях лопасти определяется с помощью интеграла Бернулли, что приводит к возможности определения силы, перпендикулярной направлению набегающего потока, а, следовательно, и подъемной силы \overline{F}_Π . Крутящий момент определяется по формуле: $M = \int_0^L F_\Pi z dz$. Полученное интегральное уравнение является сингулярным, и для построения его решения, удовлетворяющего условию Жуковского-Чаплыгина, можно использовать численную схему, данную профессором С. М. Белоцерковским. Представлены результаты оптимизации геометрии лопасти модельной ВЭУ.

Третья глава «Исследование влияния геометрии задней кромки крылового профиля на его аэродинамические характеристики» посвящена созданию программного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме на основе данных о геометрии профиля находить его коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления, а также применению этого комплекса для определения влияния преобразований задней кромки профиля на его аэродинамические характеристики. Результаты, полученные в главе, применяются для

процесса оптимизации модельной лопасти. В разделах 3.1 и 3.2 приведены введение и цели главы. В разделе 3.3 рассматриваются предшествующие работы, посвященные оценке влияния геометрии задней кромки профиля на его характеристики. Описания рассматриваемых задних кромок профилей (а именно, острой, утолщенной и утолщенной с закруглением) даны в разделе 3.4. В разделах 3.5-3.7 описывается созданный программный комплекс. В качестве расчетного механизма был выбран метод конечных объемов, предоставляемый пакетом ANSYS FLUENT. Таким образом, программный комплекс работает по конвейерному принципу, т.е. расчет характеристик для лопасти выполняется по следующей схеме: применение преобразований задней кромки – построение геометрии – построение расчетной сетки – пакетный расчет – пакетная постобработка – сбор результатов. Так, в 3.5 указываются параметры применяемой расчетной сетки. Используется гибридная сетка, полученная с помощью метода триангуляции Делоне в пакете ANSYS ICEM CFD. Количество узлов расчетной сетки составляет порядка 80000. Для учетов эффектов пограничного слоя, поверхность лопасти покрывается слоем из 20 призматических элементов с коэффициентом расширения 1,2 и толщиной первого слоя, взятой с учетом требований модели турбулентности к безразмерному коэффициенту y^+ :

$$y_a = \frac{L\sqrt{2}y^+}{Re} \sqrt{(2 \log_{10} Re - 0,65)^{2,3}}$$

В разделе 3.6 описывается используемая для расчетов численная схема. Так, в качестве расчетной схемы была выбрана схема коррекции SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), в качестве модели турбулентности — модель Спаларта-Аллмараса, а в качестве начальных условий использовались параметры стандартной атмосферы на уровне моря. В разделе 3.7 описываются утилиты, созданные для автоматизации процесса расчета. Представленные утилиты позволяют без вмешательства пользователя, на основе заранее подготовленных шаблонов файлов журналов пакетов ANSYS ICEM CFD и ANSYS FLUENT, рассчитывать характеристики профилей для широкого диапазона углов атаки и чисел Рейнольдса. Эти утилиты позволяют параллельно рассчитывать характеристики для чисел Рейнольдса, но, поскольку информация о расчете предыдущего угла атаки используется для ускорения расчета текущего, не позволяют в общем случае проводить параллельный для углов атаки

расчет. В разделе 3.8 приводится проверка корректности результатов, получаемых с помощью расчетного комплекса, с существующими результатами, полученными с помощью пакета XFOIL. Показана хорошая согласованность результатов (в среднем, расхождение не превышает 4,6%). Раздел 3.9 посвящен анализу приведенных выше преобразований задней кромки на характеристики трех аэродинамических профилей: Wortmann FX 63-137, NACA 23024, и Clark Y. Расчет профилей проводился для диапазона чисел Re $[2 \cdot 10^5, 10^6]$ с шагом, равным $2 \cdot 10^5$, и диапазона углов атаки $[-25^\circ, 25^\circ]$ с шагом, равным 1° . Резуль-

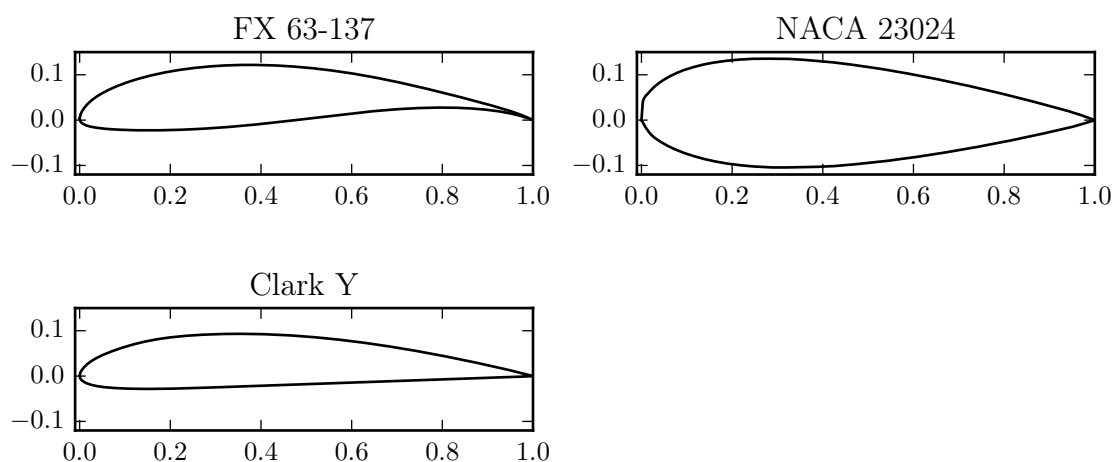


Рис. 2 — Рассматриваемые крыловые профили

таты расчетов показывают, что утолщение задней кромки приводит к увеличению коэффициента подъемной силы. При этом коэффициент лобового сопротивления увеличивается при достаточно малых значениях Re и уменьшается при достаточно больших. При этом, утолщение со скруглением задней кромки приводит к уменьшению обоих коэффициентов. В разделе 3.10 полученные результаты использованы для оптимизации геометрии лопасти аналогично процессу, проведенному в 2.3, но с введением дополнительного дискретного гена, отвечающего за геометрию задней кромки. Для результатов расчета модельной задачи приведены графики распределения угла установки, длины хорды, и типа задней кромки по размаху лопасти. В разделе представлено заключение по результатам главы.

В четвертой главе «Метод двумерных интегральных уравнений в трехмерной аэродинамической теории вращающейся лопасти» выведены два двумерных граничных интегральных уравнения, являющихся аналогией хо-

рошо известного из теории крыла интегрального уравнения

$$\frac{1}{4\pi} \iint_S \left[\frac{x - \xi}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} + 1 \right] \frac{\gamma(\xi, \eta) d\xi d\eta}{(y - \eta)^2} = F(x, y), \quad (x, y) \in S, \quad (6)$$

для вращающейся лопасти ветроустановки. Как и уравнение (6), эти интегральные уравнения требуют покрытия расчетной сеткой только поверхности лопасти, что делает их более эффективными по сравнению с существующими методами граничных элементов, в которых расчетной сеткой покрываются как лопасть, так и вихревой след, оставляемый ей. Стоит отметить, что кроме вычислительной сложности требование к дискретизации вихревого следа усложняет постановку задачи, так как он обладает нетривиальной геометрией. В разделе 4.1 приводится обоснование задачи и обзор предшествующих работ. Раздел 4.2 формулирует задачу. Так, лопасть, представляющая собой тонкую, в общем случае закрученную, пластину, которая вращается с угловой скоростью ω в установившемся однородном потоке несжимаемой идеальной жидкости или газа. Вектор скорости набегающего потока задается в декартовых координатах как $\mathbf{U}_{\text{ветра}} = \{u_0, 0, 0\}$, вращение происходит вокруг горизонтальной оси x_1 . Предполагается, что угол установки $\alpha_{\text{уст}}$ и угол атаки $\alpha_{\text{атаки}}$ малы и все точки поверхности лопасти расположены близко к вертикальной плоскости.

Считается, что течение жидкости или газа потенциально, и задача формулируется для функции потенциала, которая удовлетворяет уравнению Лапласа для потенциала:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} = 0 \quad (7)$$

для произвольной точки $x = (x_1, x_2, x_3)$, не принадлежащей поверхности S и вихревому следу.

Считается, что задача является стационарной во вращающейся системе координат, связанной с лопастью, и в неподвижной системе координат:

$$|\omega| \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0. \quad (8)$$

В линеаризованной постановке, при малых возмущениях давления p' и скорости потока \mathbf{U}' , вносимых лопастью, интеграл Бернулли приводит к следу-

ющему соотношению:

$$\frac{p'}{\rho} + u_0 U_1' - |\omega| \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = 0. \quad (9)$$

Линеаризованное граничное условие непроницаемости должно удовлетворяться на обеих сторонах лопасти (т.е. как для $x_1 = +0$, так и для $x_1 = -0$) и имеет вид

$$U_1' = |\omega| r \alpha_{\text{уст}} - u_0, \quad (x_2, x_3) \in S. \quad (10)$$

В разделе 4.3 приводится вывод граничного интегрального уравнения для приближенной теории лопасти, требующей высокой быстроходности (отношения окружной скорости конца лопасти к скорости набегающего потока). Так, из непрерывности давления p и нормальной компоненты вектора скорости U_n в жидкости за исключением области S , а также непрерывности полного вектора скорости и потенциала φ везде, кроме поверхности лопасти и вихревого следа, следует вывод, в случае высокой быстроходности витки вихревого следа приближенно параллельны друг другу и почти ортогональны оси x_1 , из чего следует, что $U_n \approx U_1$ и, как следует из (9), функция $\sigma = \partial \varphi / \partial \theta$ является непрерывной во всей жидкости, за исключением поверхности лопасти S . Тогда из основной теоремы теории потенциалов следует, что:

$$\sigma(x) = \iint_{S_{\text{ext}}} \left[\sigma(y) \frac{\partial G(y, x)}{\partial n_y} - \frac{\partial \sigma(y)}{\partial n_y} G(y, x) \right] ds_y, \quad (x \text{ вне } S_{\text{ext}}) \quad (11)$$

где $G(y, x) = 1/(4\pi|y - x|)$ — функция Грина для уравнения Лапласа. В линеаризованной постановке граничное условие в пределе при $S_{\text{ext}} \rightarrow S$, получаем

$$\frac{\partial U_n}{\partial \theta} = 0, \quad (12)$$

Для новой функции $\gamma(y) = [\sigma_+(y) - \sigma_-(y)]|_S$, представляющей собой разницу значений функции σ при $x_1 = +0$ и $x_1 = -0$ при переходе к полярной системе координат, (11) может быть переписано в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi'(x_1, r, \theta)}{\partial \theta} &= \iint_S \gamma(y) \frac{\partial G(y, x)}{\partial y_1} ds_y = \frac{x_1}{4\pi} \iint_S \gamma(y) \frac{dy_2 dy_3}{R^3}, \\ R &= R(x_1, r, \mu, \theta - \psi) = |y - x| = \\ &= \sqrt{x_1^2 + (y_2 - x_2)^2 + (y_3 - x_3)^2} = \sqrt{x_1^2 + r^2 + \mu^2 - 2r\mu \cos(\theta - \psi)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Интегрирование этого выражения по θ и последующее дифференцирование по x_1 с выполнением граничного условия (10), получим следующее основное двумерное интегральное уравнение (где $(r, \theta) \in S$):

$$\frac{1}{4\pi} \iint_S \gamma(y) \left[\int_{\theta}^{\theta_0} \frac{d\tau}{Q^3(r, \mu, \tau - \psi)} \right] dy_2 dy_3 = \frac{\partial \varphi'(0, r, \theta_0)}{\partial x_1} - |\omega| r \alpha_{\text{уст}} + u_0 \quad (14)$$

$$Q(r, \mu, \tau - \psi) = R(0, r, \mu, \tau - \psi) =$$

$$= \sqrt{(y_2 - x_2)^2 + (y_3 - x_3)^2} = \sqrt{r^2 + \mu^2 - 2r\mu \cos(\tau - \psi)}.$$

При этом ясно, что неизвестная функция $\gamma(y)$ связана с разницей аэродинамического давления между левой и правой сторонами поверхности лопасти:

$$p_- - p_+ = -\rho |\omega| \gamma. \quad (15)$$

В дальнейших рассуждениях раздела показывается, что асимптотически полученное граничное интегральное уравнение является аналогом уравнения тонкой несущей поверхности из теории крыла.

Раздел 4.4 посвящен выводу ГИУ, выполняющегося для произвольных скоростей вращения. Проводя рассуждения, подобные рассуждениям из предыдущего раздела, показывается, что для возмущенного давления p' выполняется основная теорема теории потенциала:

$$p'(x) = \iint_{S_{ext}} \left[p'(y) \frac{\partial G(y, x)}{\partial n_y} - \frac{\partial p'(y)}{\partial n_y} G(y, x) \right] ds_y, \quad (16)$$

где S_{ext} является произвольной замкнутой поверхностью, внешней относительно S , функция $G(y, x)$ — функция Грина для уравнения Лапласа в безграничном пространстве, $x = (x_1, r, \theta)$, $y = (y_1, \mu, \psi)$. В пределе при S_{ext} , стремящейся к поверхности S , выполняется

$$\frac{\partial G}{\partial n_y} \Big|_{y=+0} = \frac{\partial G}{\partial y_1} \Big|_{y_1=0}, \quad \frac{\partial G}{\partial n_y} \Big|_{y=-0} = - \frac{\partial G}{\partial y_1} \Big|_{y_1=0}. \quad (17)$$

С учетом граничных условий, для новой функции

$$\gamma(y) = |\omega| \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial \psi} \Big|_{y=+0} - \frac{\partial \varphi'}{\partial \psi} \Big|_{y=-0} \right), \quad (18)$$

которая представляет собой «скачок» аэродинамического давления при пересечении лопасти, это уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} & \left(|\omega| \frac{\partial \varphi'(x)}{\partial \theta} - u_0 \frac{\partial \varphi'(x)}{\partial x_1} \right) = \\ & = \iint_S \left[\gamma(y) \frac{\partial G(y, x)}{\partial y_1} - \left(|\omega| \frac{\partial^2 \varphi'(y)}{\partial \psi \partial y_1} - u_0 \frac{\partial^2 \varphi'(y)}{\partial y_1^2} \right) G(y, x) \Big|_{y_1=\pm 0} \right] dy_2 dy_3 \end{aligned} \quad (19)$$

Показано, что функция Грина для оператора Лапласа в цилиндрической системе координат принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} G(x_1, r, \theta) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-is(y_1 - x_1)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} G_m(r, \mu, s) \frac{1}{2\pi} e^{-im(\theta - \psi)} ds, \\ G_m(r, \mu, s) &= I_m(r|s|)K_m(\mu|s|)H(\mu - r) + \\ &+ K_m(r|s|)I_m(\mu|s|)H(r - \mu). \end{aligned} \quad (20)$$

При подстановке (20) в (19), получим, что функция φ' может быть найдена в следующем виде:

$$\varphi' = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \varphi'_m e^{-im\theta}. \quad (21)$$

Рассматривая четность и нечетность подынтегральных уравнений, входящих в (19), показывается, что оно может быть сведено к

$$\begin{aligned} & -im|\omega|\varphi'_m - u_0 \frac{\partial \varphi'_m}{\partial x_1} = \\ & \iint_S e^{im\psi} \gamma(y) dy_2 dy_3 \int_{-\infty}^{\infty} (-is) G_m(r, \mu, s) e^{is(x_1 - y_1)} ds \Big|_{y_1=0}. \end{aligned} \quad (22)$$

Если рассматривать это выражение как как ОДУ по переменной x_1 , оператор в левой его части может быть обращен:

$$\varphi'(x_1, r, \theta) = -\frac{1}{u_0} \iint_{S_0} \gamma(y_2, y_3) dy_2 dy_3 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s e^{i s x_1}}{s + m |\boldsymbol{\omega}| / u_0} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{i m [\psi - \theta]} G_m(r, \mu, s) ds. \quad (23)$$

Учитывая граничные условия (17), взятые в виде

$$\left. \frac{\partial \varphi'}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = |\boldsymbol{\omega}| r \alpha_{\text{уст}} - u_0,$$

(23) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{i}{u_0} \iint_S \gamma(y_2, y_3) dy_2 dy_3 \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{s^2 e^{i m [\psi - \theta]}}{s + m |\boldsymbol{\omega}| / u_0} [I_m(r |s|) K_m(\mu |s|) H(\mu - r) + \\ + K_m(r |s|) I_m(\mu |s|) H(r - \mu)] ds = |\boldsymbol{\omega}| r \alpha_{\text{уст}} - u_0, \quad (24) \end{aligned}$$

что и является основным граничным интегральным уравнением точной теории тонкой лопасти ВЭУ.

В разделе 4.5 приводится численная схема для решения интегрального уравнения, приведенного в разделе 4.3. При этом лопасть для простоты рассуждений считается прямоугольной ($S = (\ell, L) \times (-b, b)$). Интеграл по τ в уравнении (14) представляется в виде суммы двух интегралов: 1) по контуру, находящемуся внутри области S ($\theta \leq \tau \leq \theta_b$); 2) по контуру, находящемуся целиком в жидкости ($\theta_b \leq \tau \leq \theta_0$). В результате, для полного ядра основного двумерного интегрального уравнения (14), получим следующее выражение:

$$K = K_0 + K_c,$$

$$K_0(y, x) = \frac{1}{r} \left[\frac{\xi_3 - y_3}{(y_2 - x_2)^2 \sqrt{(\xi_3 - y_3)^2 + (y_2 - x_2)^2}} \right]_{\xi_3=x_3}^b, \quad (25)$$

$$K_c(y, x) = K_c(r, \mu, \psi) = \int_{\theta_b}^{\theta_0} \frac{d\tau}{Q^3}, \left[\int \frac{d\eta}{(\eta^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\eta}{a^2 \sqrt{\eta^2 + a^2}} \right],$$

где $\xi_2 = r \cos \tau$, $\xi_3 = r \sin \tau$. Главная часть ядра $K_0(y, x)$ является гиперсингулярной вдоль размаха лопасти. Применяемая численная схема основана на методе дискретных вихрей, изначально разработанном для уравнения несущей поверхности (6) С. М. Белоцерковским. Для главного гиперсингулярного ядра в (25) интегрирование по переменной y_2 может быть произведено в явном виде ($x_2 = x_2^i, i = 1, \dots, N_2$):

$$\int_{\ell}^L \gamma(y_2, y_3) K_0(y, x) dy_2 \approx$$

$$- \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N_2} \gamma(x_2^j, y_3) \left[\frac{\sqrt{(\xi_3 - y_3)^2 + (y_2 - x_2)^2}}{(\xi_3 - y_3)(y_2 - x_2)} \right]_{\xi_3=x_3}^b \bigg|_{y_2=x_2^j-h_2/2}^{x_2^j+h_2/2}, \quad (26)$$

Квадратурная формула для регулярной части ядра K_c может быть записана аналогично. При переходе к дискретной форме, поведение сингулярности типа Коши $O[1/(x_3 - y_3)]$, ($y_3 \rightarrow x_3$) вдоль направления хорды x_3 в главной части ядра, можно корректно трактовать, используя две различные сетки — отдельно для внутренней переменной y_3 и внешней x_3 .

Таким образом, узлы первой сетки должны быть расположены посредине между соответствующими узлами второй: $x_3^n = -b + (n - 1/2)h_3$, $y_3^m = x_3^m + h_3/2 = -b + mh_3$, ($n, m = 1, \dots, N_3$), $h_3 = 2b/(N_3 + 1)$. Здесь N_3 — размерность сетки вдоль вертикальной оси x_3 . Такая сетка гарантирует автоматическое выполнение гипотезы Жуковского-Чаплыгина об ограниченности аэродинамического давления на кромке, ближайшей к узлу внешней сетки. В результате, двумерное интегральное уравнение с главным ядром K_0 в дискретной форме принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
\int_{\ell}^L \int_{-b}^b \gamma(y_2, y_3) K_0(y_2, y_3, x_2^i, x_3^n) dy_2 dy_3 &\approx -\frac{h_3}{r} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{m=1}^{N_3} \gamma(x_2^j, y_3^m) \times \\
&\times \left[\frac{\sqrt{(\xi_3 - y_3^m)^2 + (y_2 - x_2^i)^2}}{(\xi_3 - y_3^m)(y_2 - x_2^i)} \right]_{\xi_3=x_3^n}^b \bigg|_{y_2=x_2^j-h_2/2}^{x_2^j+h_2/2}, \\
(1 \leq i \leq N_2, 1 \leq n \leq N_3), \quad r &= \left[(x_2^i)^2 + (x_3^n)^2 \right]^{1/2}.
\end{aligned} \tag{27}$$

Показано, что интегральный оператор, примененный к ядру K_c в дискретной форме сводится к следующему приближенному отношению ($r = \sqrt{(x_2^i)^2 + (x_3^n)^2}$):

$$\begin{aligned}
\int_{\ell}^L \int_{-b}^b \gamma(y_2, y_3) K_c(y_2, y_3, x_2^i, x_3^n) dy_2 dy_3 &\approx h_3 \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{m=1}^{N_3} \gamma(x_2^j, y_3^m) \times \\
&\times \left\{ \int_b^r \frac{(y_2 - \sqrt{r^2 - \xi_3^2}) d\xi_3}{\sqrt{r^2 - \xi_3^2} (\xi_3 - y_3^m)^2 \sqrt{(\xi_3 - y_3^m)^2 + (y_2 - \sqrt{r^2 - \xi_3^2})^2}} + \right. \\
&\left. + \int_0^r \frac{(y_2 + \sqrt{r^2 - \xi_3^2}) d\xi_3}{\sqrt{r^2 - \xi_3^2} (\xi_3 - y_3^m)^2 \sqrt{(\xi_3 - y_3^m)^2 + (y_2 + \sqrt{r^2 - \xi_3^2})^2}} \right\}_{y_2=x_2^j-h_2/2}^{x_2^j+h_2/2}.
\end{aligned} \tag{28}$$

Далее приводится итерационный процесс, позволяющий решить полученное интегральное уравнение. Приводится сравнение результатов для модельной лопасти, полученных с помощью представленного ГИУ с результатами, полученными с помощью пакета конечных объемов ANSYS CFX. Так, для достижения сравнимой точности ГИУ потребовалось более чем в два раза меньше времени. При этом хорошее совпадение наблюдалось для сечений лопасти, удаленных от оси ротора, в то время как для близких к оси совпадение было несколько хуже (рис. 3).

В разделе 4.6 представлены выводы о полученных результатах.

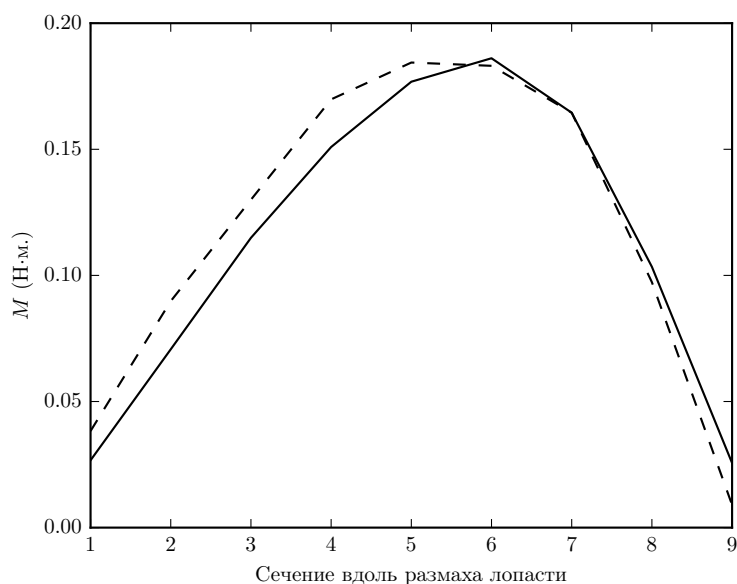


Рис. 3 — Распределение вращательного момента по сечениям лопасти (сплошная линия — расчет с помощью МГИУ, пунктир — расчет с помощью ANSYS CFX)

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

В диссертационном исследовании представлен метод оптимизации лопасти горизонтально-осевой ветроэнергоустановки (ВЭУ) с применением генетического алгоритма (ГА); представлены механизмы получения необходимой информации об аэродинамических характеристиках лопасти, требуемой для некоторых методов, применяемых в основе построения целевой функции генетического алгоритма; проведено исследование и расчет аэродинамических характеристик некоторых профилей с утолщенной и закругленной задними кромками, которые могут быть использованы в задаче оптимизации, а также могут быть использованы вместо оригинальных профилей при производстве лопастей ВЭУ для снижения затрат на шлифовку; разработаны двумерные граничные интегральные уравнения, позволяющие сократить время расчета по сравнению с методами конечных элементов и конечных объемов при предоставлении сравнимых результатов, что позволяет использовать их в качестве основы для целевой функции генетического алгоритма.

Результаты диссертационного исследования заключены в следующем:

1. Разработан и реализован генетический алгоритм для нахождения оптимальной геометрии лопасти ВЭУ. Семейство генетических алго-

ритмов обладает преимуществом над такими методами оптимизации, как метод градиентного спуска, поскольку не требует задания градиента целевой функции и значительно реже сходится к локальному оптимуму вместо глобального за счет того, что более широко охватывает пространство поиска на каждой итерации. Реализация генетического алгоритма разработана в первую очередь для задачи оптимизации геометрии (угла установки и длины хорды по размаху) лопасти, однако является гибкой и может быть адаптирована для решения иных задач.

2. Разработана целевая функция для ГА, основанная на элементной теории. Эта теория не учитывает влияния сечений лопасти друг на друга, и требует априорного знания аэродинамических характеристик профилей, лежащих в основе лопасти, но при этом является крайне вычислительно эффективной, что позволяет проводить оптимизацию лопастей в реальном времени. Используя эту целевую функцию, проведена оптимизация лопасти ВЭУ малого диаметра.
3. Разработана целевая функция для ГА, основанная на одномерном интегральном уравнении и гипотезе плоских сечений. Эта функция может быть использована для оптимизации тонких лопастей, однако может использоваться только для оптимизации на ограниченном множестве углов установки. Проведена оптимизация лопасти ВЭУ малого диаметра, представляющей собой тонкую закрученную пластину переменной хорды.
4. Для получения коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления различных профилей создан комплекс программ, использующий для работы пакет ANSYS, который может рассчитать эти коэффициенты для различных углов атаки и чисел Рейнольдса, основываясь только на геометрии лопасти. Используя полученный комплекс, проведен расчет аэродинамических характеристик трех крыльевых профилей (Wortmann FX 63-137, Clark Y и NACA 23024).
5. Проведено исследование влияния изменения геометрии задней кромки на ее аэродинамические характеристики. Для этого рассмотрены операции утолщения и закругления задней кромки. Исследование трех профилей с применением этих преобразований с помощью

разработанного комплекса программ показало, что на практически применяемых режимах обтекания утолщение задней кромки профиля приводит к повышению коэффициента подъемной силы и повышению коэффициента лобового сопротивления при числах Рейнольдса ниже числа, зависящего от лопасти и параметров преобразования, и понижению при больших числах Рейнольдса. Применение закругления задней кромки приводит к снижению как коэффициента лобового сопротивления, так и коэффициента подъемной силы, при этом качество лопасти увеличивается в случаях профилей Wortmann FX 63-137 и NASA 23024 и не изменяется значительно в случае профиля Clark Y.

6. Выведено двумерное граничное интегральное уравнение (ГИУ) для нахождения скачка потенциала скорости на лопасти, которое, в отличие от существующих граничных уравнений, применяемых в аэродинамике лопасти ВЭУ, выполняется только по поверхности лопасти и не требует покрытия сеткой вихревого следа. Вывод этого уравнения осуществлялся в рамках линеаризованной теории, что ограничивает его применение небольшими углами установки. Кроме того, наилучшее соответствие с экспериментальными данными имеет место в случае быстроходных ВЭУ.
7. Выведено двумерное граничное интегральное уравнение для скачка давления на лопасти, которое, как и предыдущее ГИУ, не требует покрытия сеткой вихревого следа. Использование этого уравнения не ставит ограничения на быстроходность ВЭУ.
8. Приведен численный метод решения полученных ГИУ.
9. Проведен численный расчет тонкой лопасти с помощью ГИУ для скачка потенциала скорости и проведено сравнение с данными, полученными с помощью метода конечных объемов (МКО). Показано, что расхождение между данными, полученными с помощью этих методов, не превышает в среднем 6%. При этом время расчета с помощью метода ГИУ значительно меньше времени расчета с помощью МКО. Уменьшенное время расчета делает метод ГИУ более перспективным по сравнению с МКО в задачах оптимизации лопасти ВЭУ, где требуется большое количество вычислений целевой функции.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Бондарчук А. А., Мещеряков К. И., Сумбатян М. А.* Оптимизация геометрии лопасти турбины ветроэнергетической установки с применением генетического алгоритма // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2013. — Т. 3. — С. 19—23.
2. *Сумбатян М. А., Мещеряков К. И.* Оптимизация геометрии лопасти ветротурбины, работающей в туннеле постоянного диаметра // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2014. — Т. 3. — С. 32—37.
3. *Мещеряков К. И., Сумбатян М. А.* Изучение влияния некоторых геометрических преобразований задней кромки профилей на их аэродинамические характеристики // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — № 3.
4. *Mescheryakov K., Sumbatyan M., Bondarchuk A.* A boundary integral equation over the thin rotating blade of a wind turbine // Engineering Analysis with Boundary Elements. — 2016. — No. 71. — Pp. 20–26.
5. *Мещеряков К. И.* Определение геометрии вихревой пелены при оптимизации лопасти ветроэнергетической установки с использованием метода вихревой решетки // Труды аспирантов и соискателей Южного Федерального Университета. Т. XVIII: Южный Федеральный Университет. Ростов н/Д. Изд-во ЮФУ. — 2010. — С. 37—41.
6. *Бондарчук А. А., Мещеряков К. И.* Некоторые полуаналитические решения уравнений динамики вязкого газа и их применение в модельных задачах гидродинамики // Современные проблемы механики сплошной среды. Труды XIV Международной конференции, г. Ростов-на-Дону. Т. 2. — 2010. — С. 37—41.
7. *Мещеряков К. И.* Реализация спектрального метода в применении к анализу устойчивости атмосферных потоков // Неделя науки 2010. Сборник тезисов — Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. — 2010. — С. 81—83.

8. *Бондарчук А. А., Мещеряков К. И.* Применение генетического алгоритма к задаче оптимизации геометрии турбины лопасти ВЭУ // Современные проблемы механики сплошной среды. Труды XVI Международной конференции, г. Ростов-на-Дону. Т. 2. — 2012. — С. 46—50.
9. *Сумбатян М. А., Мещеряков К. И.* Интегральное уравнение в аэродинамике лопасти ВЭУ // Международная научная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения — III», г. Ростов-на-Дону. Тезисы докладов. Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, Ростов-на-Дону. — 2013. — С. 84—85.
10. *Мещеряков К. И.* Интегральное уравнение для расчета свойств ветротурбины в цилиндре постоянного диаметра // Труды XVII Международной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды», Ростов-на-Дону, 14-17 октября 2014 г., Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. Т. 2. — 2014. — С. 104—108.
11. *Сумбатян М. А., Мещеряков К. И.* Интегральное уравнение в трехмерной теории вращающейся лопасти ВЭУ // Тезисы докладов Международной научной конференции «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения — V» в г. Ростове-на-Дону, 26.04-01.05.2015. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ. — 2015. — С. 144—145.
12. *Мещеряков К. И.* Функция Грина и двумерное интегральное уравнение по поверхности вращающейся лопасти ветроустановки // Труды IV Межд. конф. «Актуальные проблемы м.с.с.», 21-26 сентября 2015 г., Цахкадзор, Армения. — Ереван: Национальный университет архитектуры и строительства Армении. — 2015. — С. 277—281.